

## **ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ НА ПОЗИЦИЯХ «НПО АВТОМАТИКИ»**

**Кутовой Д.А., Перепелкина С.Ю., Федотов А.А.**

*АО «Научно-производственное объединение автоматики им. академика Н.А. Семихатова» 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 145, E-mail: [avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru) тел.: (343) 355-95-25, факс: (343) 269-74-00*

**Аннотация:** Настоящая статья посвящена исследованиям образцов бесплатформенных инерциальных блоков (БИБ) на предмет оценки основных характеристик измерителей угловой скорости и линейного ускорения, включая шумовые составляющие измерительного канала. Исследования проводились на отработочных позициях АО «НПО автоматики» – поворотном столе и стенде качания цифрового моделирующего комплекса (ЦМК). Оцениваемыми характеристиками являются основные параметры модели измерений БИБ, а также ряд типовых шумовых составляющих. В процессе исследований выполняется статистическая обработка информации отдельно по каждому измерительному каналу, в том числе с использованием вариации Аллана. Дополнительно выполняется совместная обработка данных. В обоих случаях используется один из методов многопараметрической оптимизации. Приведены оценки уровня методической погрешности для рассматриваемых методик на основе математического моделирования измерительной информации.

Ключевые слова: бесплатформенный инерциальный блок, инерциальные измерители, поворотный стол, динамический стенд, многопараметрическая оптимизация, вариации Аллана.

## **ORGANIZATION AND CONDUCTING RESEARCH OF INERTIAL MEASURING INSTRUMENTS ON POSITIONS OF SPA OF AUTOMATICS**

**Kutovoy D.A., Perepelkina S.Yu., Fedotov A.A.**

*Scientific Production Association of Automatics named after the academician N.A. Semikhatov, JC 145, Mamina-Sibiryaka, Ekaterinburg, 620075, E-mail: [avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru) tel .: (343) 355-95-25, fax: (343) 269-74-00*

**Abstract:** This paper is devoted to the study of samples of strapdown inertial unit (SIU) to assess the basic characteristics of angular and linear acceleration accelerometers, including the noise components of the measuring channel. The studies were conducted on development positions of SPA of Automatics - the turn table and dynamic test stand of digital simulation complex (DSC). The estimated characteristics are the main parameters of measurements model of SIU, as well as a number of typical noise components. In the course of research the statistical processing of information is carried out separately for each measuring channel, also with the help of the Allan variance. Additionally, the coprocessing of data is performed. In both cases, one of the multiparametric optimization methods is used. The paper gives the estimates of the level of method errors for the concerned technique based on mathematical modeling of measurement information.

Key words: strapdown inertial unit, inertial sensors, turntable, dynamic stand, multiparametric optimization, Allan variance.

## **Введение**

В статье рассмотрены вопросы практической организации исследований различных типов бесплатформенных инерциальных блоков (БИБ) на отработочных позициях АО «НПО автоматики» (далее – НПОА) в наземных условиях.

Также в работе рассмотрены методические аспекты оценки основных характеристик инерциальных измерителей в части масштабного коэффициента, смещения нулевого сигнала, погрешности ориентации инерциальных измерителей относительно номинального положения, а также ряда типовых шумовых составляющих измерительного канала.

В качестве отработочных позиций рассмотрены поворотный стол КИН-52 и стенд динамических перемещений (далее – стенд качания), являющиеся принадлежностью цифрового моделирующего комплекса (ЦМК) НПОА и оборудованные соответствующей измерительной аппаратурой и программно-математическим обеспечением [1].

Описаны методы оценки основных характеристик инерциальных измерителей на основе статической обработки выходной измерительной информации и с использованием многопараметрической оптимизации. Оценка шумовых характеристик инерциальных измерителей проводится по методу вариации Аллана [2, 3], который позволяет оценивать тренд выходного сигнала, случайное блуждание скорости изменения выходного сигнала, нестабильность смещения нулевого сигнала, случайное блуждание выходного сигнала и шум квантования.

Для методик на основе метода многопараметрической оптимизации и метода вариации Аллана приведены оценки уровня методической погрешности, полученные с помощью математического моделирования измерительной информации.

## **Описание отработочных позиций**

### 1 Поворотный стол КИН-52

Для исследования точностных характеристик БИБ в условиях действия вектора угловой скорости вращения Земли  $\vec{\Omega}_3$  и вектора ускорения свободного падения  $\vec{g}$  на ЦМК существует отработочная позиция включающая в себя:

- двухосный поворотный стол КИН-52, обеспечивающий путем разворота относительно двух своих осей выставку измерительных осей БИБ в различные пространственные положения относительно сторон света и направления вертикали;
- алюминиевую плиту диаметром  $\sim 1,2$  м, закрепленную на КИН-52 и служащую установочной поверхностью для БИБ;
- ПЭВМ, подключенную к БИБ, с соответствующим ПО разработки НПОА, обеспечивающим регистрацию его выходной информации в процессе прогона в реальном масштабе времени.

Двухосный поворотный стол КИН-52 (см. рисунок 1) посредством разворотов вокруг наружной и внутренней осей вращения позволяет выставить приборную систему координат (ПСК) БИБ, связанную с осями чувствительности (ОЧ) блока чувствительных элементов (БЧЭ), в различные характерные положения относительно местной

географической системы координат (ГСК) **ОННЕ**. Ориентация ОЧ БЧЭ относительно осей ПСК БИБ, маркированной на корпусе прибора, известна с точностью до погрешностей выставки ОЧ. ГСК **ОННЕ** определена следующим образом

- ось **ОН** направлена вверх по линии отвеса в месте размещения БИБ;
- ось **ОН** лежит в плоскости местного горизонта и направлена на Север;
- ось **ОЕ** дополняет систему координат до правой (направлена на Восток).

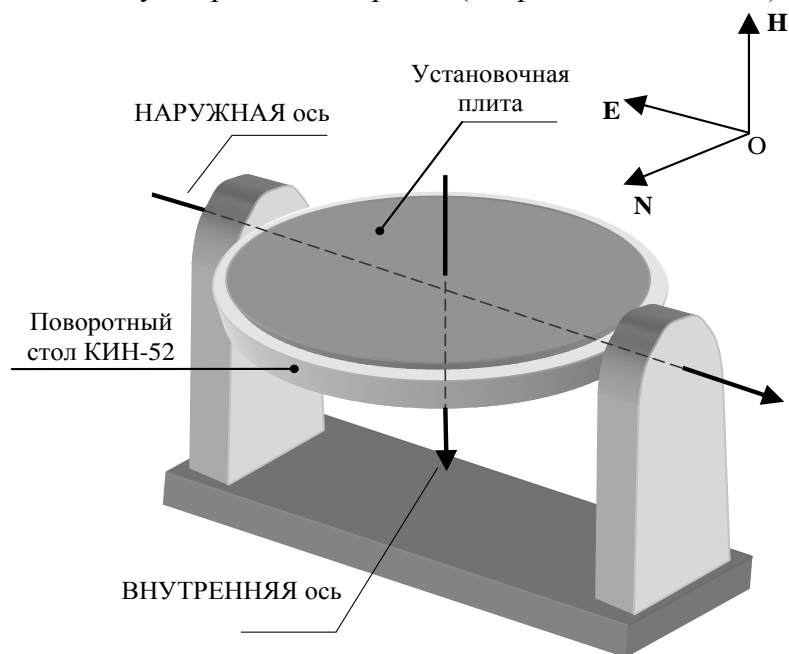
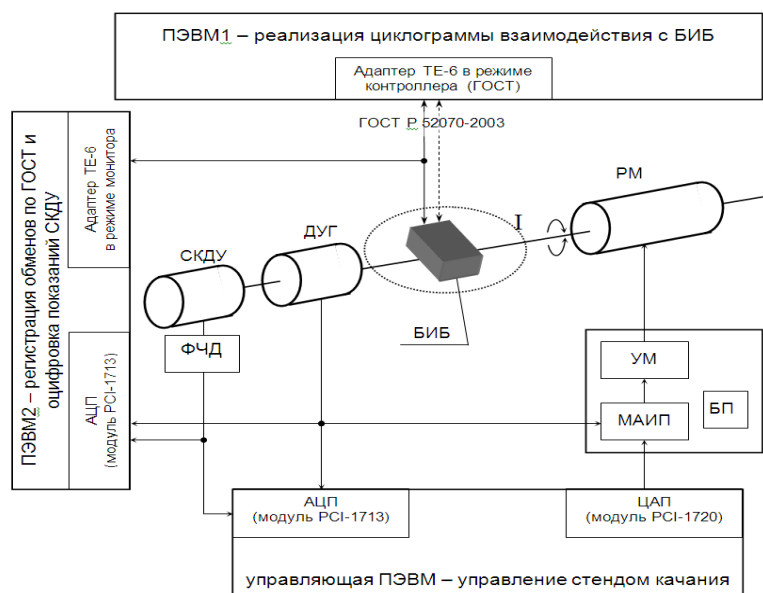


Рисунок 1 – Двухосный поворотный стол КИН-52

Для каждого исследуемого образца БИБ разрабатывается индивидуальная последовательность выставляемых положений ПСК относительно ГСК, определяемая количеством и ориентацией ОЧ БЧЭ и возможностями ее реализации посредством разворотов поворотного стола. Последовательность положений, как правило, включает в себя шесть полных (на 360 угл.град) оборотов основания вокруг каждой из осей ПСК по и против часовой стрелки и ряд попарно симметричных выставляемых положений ОЧ, в которых проекции измеряемой величины присутствуют с разными знаками.

## 2 Стенд качания

Одноосный стенд качания, структурная схема которого приведена на рисунке 3, обеспечивает физическое воспроизведение угловых перемещений основания относительно горизонтальной оси с амплитудой качания в пределах  $\pm 15$  угл.град в рабочем диапазоне частот до 1,0 Гц. Управление стендом качания производит управляющая ПЭВМ с тактом 0,5 – 10,0 мс, при этом погрешность информации об угле качания не превышает 2 угл.мин. Возврат в исходное положение после снятия управляющего воздействия выполняется с погрешностью не более 20 угл.с..



Стенд качания включает в себя следующее основное оборудование: установочный стол 1 с одной осью качания, управляющую ПЭВМ, оснащенную цифро-аналоговым (ЦАП) и аналого-цифровым (АЦП) преобразователями, масштабирующий аналого-импульсный преобразователь (МАИП) с усилителем мощности (УМ) и блоком питания (БП), электрогидравлическую рулевую машину (РМ), потенциометр обратной связи, реализованный посредством «грубого» датчика угла (ДУГ), синусно-косинусный датчик угла (СКДУ), фазо-чувствительный детектор (ФЧД), а также источники питания и кабели сопряжения.

Для повышения точности приема информации об угловых перемещениях установочного стола 1 и снижения уровня квантования и шумовых составляющих используется также информация с выхода СКДУ, которая с помощью ФЧД преобразуется из сигнала переменного тока в сигнал постоянного тока в двух диапазонах – грубого и точного отсчетов (ГО и ТО) и через модуль PCI-1713 поступает в управляющую ПЭВМ для регистрации. Привязка по времени моментов съема измерений фактических углов заклона стенда к шкале времен управляющей ПЭВМ осуществляется с точностью не хуже 5 мкс.

ветровые и прочие возмущения, действующие на изделие на участках предстартовой подготовки и полета.

Осуществляемая в темпе прогона регистрация информации разноименных составляющих в единой шкале времени обеспечивает в процессе вторичной обработки решение задачи взаимной привязки разноименных составляющих, а также позволяет опытным путем определить инерционность приборов относительно управляющего воздействия.

### **Оценка точностных характеристик инерциальных измерителей**

С целью подтверждения заявленных разработчиком основных характеристик БИБ и получения оценок параметров математической модели погрешностей (ММП) гироскопических (ГК) и акселерометрических (АК) измерительных каналов прибора разработана соответствующая методика на основе известных методов. Оценки параметров ММП ГК и АК проводились по выходной информации БЧЭ прибора.

В процессе обработки измерительной информации БИБ используются средства Microsoft Excel 2010 и специализированное ПО разработки АО «НПО автоматики».

#### 1 Первичная статическая обработка информации БЧЭ БИБ.

Для проведения статистической обработки выходной информации БЧЭ на первом этапе проверяется соответствие первичной информации нормальному закону распределения плотности вероятности [4].

Затем для каждого прогона рассчитываются средние величины замеров по всем измерениям в каждом положении (среднее в запуске) и среднее квадратическое отклонение (СКО) разброса замеров в точках относительно среднего – нестабильность в запуске ( $\sigma$ ). По группам положений в прогонах рассчитываются среднее по всем запускам и нестабильность среднего от запуска к запуску с учетом отбраковки аномальных измерений.

Соответствие проверяется посредством двух методов – графического и с использованием критерия Эппса-Палли. Графический метод, в строгом смысле, не является критерием отклонения от нормального распределения. Однако он дает наглядную информацию по типу отклонения на основе построения графика кумулятивной функции вероятности по экспериментальным данным. Если полученная кумулятивная функция вероятности приближается к прямой линии, то распределение считается нормальным.

Для строгого подтверждения соответствия выборки нормальному распределению применяется критерий Эппса-Палли, использующий сумму квадратов модулей разности между характеристическими функциями на основе выборочных данных и нормального распределения с весовыми коэффициентами.

По  $n$ -му количеству наблюдений  $x_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n; n \geq 8$ ) вычисляют следующие параметры:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \text{ и } m_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( x_j - \bar{x} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\bar{x}$  – среднее арифметическое,

$m_2$  – выборочный центральный момент второго порядка,

$n$  – объем выборки.

Гипотезу соответствия рассматриваемого распределения нормальному закону подтверждают или отклоняют в зависимости от результатов сравнения величины  $T_{EP}$  (статистика критерия Эппса-Палли):

$$T_{EP} = 1 + \frac{n}{\sqrt{3}} + \frac{2}{n} \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} \exp \left\{ \frac{-(x_j - x_k)^2}{2m_2} \right\} - \sqrt{2} \sum_{j=1}^n \exp \left\{ \frac{-(x_j - \bar{x})^2}{4m_2} \right\} \quad (2)$$

с таблично заданным  $P$ -квантилем статистики критерия  $T_{EP}$  для заданных уровня значимости  $\alpha$  и объема выборки  $n$ .

## 2 Использование метода многопараметрической оптимизации.

Классическая задача уточнения параметров математической модели погрешностей блока чувствительных элементов (БЧЭ) навигационного измерителя решается, путем обработки показаний с его измерительных осей, выставляемых в различные характерные положения в одном запуске.

В рамках работ по поиску путей упрощения требуемых испытаний для уточнения параметров модели погрешностей БЧЭ БИБ и повышения точности их оценки была разработано методическое и программное обеспечение, позволяющее оценить параметры модели погрешностей БЧЭ БИБ на основе апостериорной обработки результатов измерений следующим образом [5]. При обработке результатов измерений осуществляется численное решение нелинейной системы уравнений, составленной в соответствии с моделью погрешностей БЧЭ БИБ. Уравнения связывают уточняемые параметры модели погрешностей с заранее известными с высокой точностью измеряемыми характеристиками в месте проведения испытаний. Для стационарных условий это: проекции вектора ускорения свободного падения и вектора скорости вращения Земли на измерительные оси БЧЭ БИБ.

Минимизируется разность между оценкой измеряемой величины, действующего на БЧЭ БИБ в каждом уравнении и соответствующим эталонным значением. При этом варьирование оцениваемых параметров ММП БИБ приводит к их уточнению.

$$f(P_1, P_2, \dots, P_n) = \|\bar{a}\| \quad (3)$$

где  $f$  – функция от оцениваемых параметров, характеризующая действующее на БЧЭ БИБ ускорение;

$P_i$  – оцениваемые параметры ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), включающие масштабные коэффициенты, смещения нулей и углы  $\alpha, \beta$ ;

$\|\bar{a}\|$  – абсолютное значение эталона измеряемой величины.

Для решения системы (3) составляется целевая функция вида:

$$\sum (f - \|\bar{a}\|)^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

Оптимизация целевой функции осуществляется с привлечением одного из методов многопараметрической оптимизации, например, метода покоординатного спуска. Также вместо метода покоординатного спуска может использоваться другой метод оптимизации, в том числе один из градиентных методов, в зависимости от особенностей оцениваемой ММП.

Методика протестирована путем моделирования акселерометрической измерительной информации с внесением погрешностей измерения. Проведена апробация методики по результатам испытаний опытного образца БИБ на поворотном столе отработочной позиции НПОА [5].

### 3 Использование метода вариации Аллана.

Оценка шумовых составляющих измерительного канала по методу вариации Аллана строится на обработке показаний измерителя, зарегистрированных в течение длительного интервала наблюдения при стационарном положении самого измерителя [6]. При этом каких-то специальных требований к его ориентации относительно измеряемой величины не предъявляется.

Формула для расчета вариации Аллана  $\sigma_A^2(\tau)$  при условии равномерного шага опроса инерциального измерителя имеет следующий вид:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^{L-2l} \left( \sum_{i=1}^l (\Delta N(t_{n+i}) - \Delta N(t_{n+l+i})) \right)^2}{2 \cdot \tau^2 \cdot (L - 2 \cdot l + 1)}, \quad (5)$$

где  $\tau = l \cdot \Delta t$  – интервал осреднения данных измерителя,

$l$  – количество опросов на интервале осреднения ( $l = 1, 2, \dots \leq L/2$ ),

$L$  – общее количество опросов в обрабатываемом наборе информации,

$\Delta t = (t_i - t_{i-1})$  – шаг опроса данных измерителя,

$\Delta N(t_i)$  – данные инерциального измерителя за шаг опроса  $\Delta t$  на момент  $t_i$ .

Длительность интервала наблюдения определяется количеством измерений, необходимых для достижения требуемой точности оценки шумовых характеристик. В руководстве [6] расчет вариации Аллана предполагается проводить на интервале  $0 < \tau \leq L/2$  с шагом съема первичной измерительной информации  $\Delta t$  при количестве опросов измерителя в запуске  $L$ . Однако на практике, с целью сокращения времени вычислений в  $\sim 10^3$  раз с одновременным сохранением точности вычислений, расчет вариации Аллана  $\sigma_A^2(\tau)$

предлагается осуществлять с сохранением равномерности шага осреднения в логарифмическом масштабе [3]. При этом формула для вычисления интервала осреднения данных принимает следующий вид  $\{\tau_k\} = \{\Delta t \cdot [2^{0,1k}]_{ЦЧ}\}$ , где  $k = 0, 1, \dots, NK$  и  $NK = 10 \cdot [\log_2(L/2)]_{ЦЧ}$ .

Оценка шумовых составляющих измерительного канала осуществляется путем представления вариации Аллана  $\sigma_A^2(\tau)$  посредством аппроксимирующей функции  $p_A^2(\tau)$  [7]:

$$\sigma_A^2(\tau) \approx p_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}, \quad (6)$$

где коэффициенты  $R, K, B, N, Q$  связаны определенными соотношениями [6] с известными типовыми шумовыми составляющими – трендом выходного сигнала, случайным блужданием скорости изменения выходного сигнала, нестабильностью смещения нулевого сигнала, случайным блужданием выходного сигнала и шумом квантования соответственно.

Определение значений коэффициентов  $R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2$  осуществляется с использованием способа многопараметрической оптимизации, заключающийся в минимизации по набору квадратов коэффициентов  $R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2$  для заданного набора интервалов осреднения  $\{\tau_k\}$  нелинейной целевой функции вида [5]:

$$\sum_{k=0}^K \left| \ln(\sigma_A^2(\tau_k)) - \ln(p_A^2(\tau_k)) \right| \xrightarrow{R^2, K^2, B^2, N^2, Q^2} \min. \quad (7)$$

Оценка методической погрешности предложенного способа оценки шумовых составляющих измерительного канала проводилась по специальной программе разработки НПОА путем математического моделирования измерительной информации и пяти типовых шумовых составляющих [3].

По результатам моделирования получено, что методическая погрешность оценки по каждой из пяти шумовых составляющих – тренда выходного сигнала, случайного блуждания скорости изменения выходного сигнала, нестабильности смещения нулевого сигнала, случайного блуждания выходного сигнала и шума квантования – не превышает ~0,1%, ~3,0%, ~4,5%, ~0,2% и ~1,0% от заданной величины соответственно.

В общем случае методическая погрешность может быть большой из-за возможной неопределённости задачи разложения шумов по отдельным составляющим. В этом случае вариация Аллана может использоваться для получения оценок сверху для исследуемых типов шумов, а также для контроля корректности оценок шумовых характеристик измерительных каналов.

## Заключение



Описаны отработочные позиции АО «НПО автоматики» используемые для оценки основных характеристик инерциальных измерителей – поворотный стол и динамический стенд.

Рассмотрены основные методики оценки точностных характеристик инерциальных измерителей посредством статической обработки измерительной информации и метода многопараметрической оптимизации. Для оценки шумовых составляющих посредством метода вариации Аллана.

Приведены оценки уровня методической погрешности на основе математического моделирования измерительной информации для методик на основе метода многопараметрической оптимизации и метода вариации Аллана.

### **Список литературы**

1. Вдовин М.В. Обеспечение испытаний и результаты исследования ряда бесплатформенных инерциальных блоков на базе волоконно-оптических гироскопов / М.В. Вдовин, Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина, П.В. Ситников, А.А. Федотов // Труды V НТК молодых ученых и специалистов. – Москва : ФГУП НПЦАП им. академика Н.А. Пилюгина. – 2013. – С. 347–360.
2. Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards // Proc. IEEE. – Vol. 54, N2.
3. Кутовой Д. А. К вопросу оценки шумовых составляющих измерительного тракта по методу вариации Аллана / Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Гироскопия и навигация №2(89). – 2015. – С. 30 – 39.
4. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений // Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – Москва : Наука, 1969. – 511 с.
5. Кутовой Д. А. Оценка параметров математической модели БИБ посредством многопараметрической оптимизации / Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина, П.В. Ситников // Навигация и управление движением. Материалы XVI конференции молодых ученых. – Санкт-Петербург. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2014. – С. 195 – 200.
6. IEEE Std 1554-2005 IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.
7. Кутовой, Д.А. Использование вариации Аллана для практического определения структуры шумов инерциальных измерителей / Д.А. Кутовой, С.Ю. Перепелкина, А.А. Федотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 67–72.

### **References**

1. Vdovin M.V. Provision of testing and research results of a number of strapdown inertial unit on the basis of fiber-optic gyroscopes / M.V. Vdovin, D.A. Kutovoy, O.I. Maslova, S. Yu. Perepelkina, P.V. Sitnikov, A.A. Fedotov // Proceedings of the 5th Scientific and Technical Conference of young scientists and specialists. - Moscow: FSUE NPTSAP them. Academician N.A. Pilyugin. - 2013. - pp. 347-360. (in Russ.)
2. Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards // Proc. IEEE. – Vol. 54, N2.

3. Kutovoy D.A. On the issue of estimation of the measuring path noise terms according to the Allan variance method /D.A. Kutovoy, O.I. Maslova, S.Yu. Perepelkina, A.A. Fedotov // *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2015, no. 2(89). pp. 30 – 39. (In Russ.)
4. Smirnov N.V. The course of the theory of probability and mathematical statistics for technical applications // N.V. Smirnov, I.V. Dunin-Barkovskii. – Moscow : Nauka, 1969 – 511 p. (in Russ.)
5. Kutovoy D.A. Estimation of the parameters of the mathematical model SIU through a lot of option-parameter-optimization / D.A. Kutovoy, S.Yu. Perepelkina, P.V. Sitnikov // *Navigation and Motion Control. Materials 16th conference of young scientists. - St. Petersburg. : SSC RF JSC Concern CRI Electropribor. - 2014. - pp. 195 - 200. (in Russ.)*
6. IEEE Std 1554-2005 IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equip-ment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.
7. Kutovoy D.A., Perepelkina S.Yu., Fedotov A.A. Use of Allan Variance for Practical Determination of Noise Structure of Inertial Measurement Units. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 67–72. (in Russ.)